

2013

Pracoviště:	Katedra elektromechaniky a výkoné elektroniky
Výzkumná zpráva č.:	22190 – 017 – 2013

Návrh rezonanční vazby ve tvaru solenoidu pro bezdrátové nabíjení

Druh úkolu:	vědecko-výzkumný
Řešitelé:	Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.
	Ing. Tomáš Kavalír
	Ing. Roman Pechánek, Ph.D.
	Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
Vedoucí úkolu:	Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.
Počet stran:	30
Datum vydání:	1. 7. 2013
Revize:	1.0
podpořeno projekty:	CZ.1.05/2.1.00/03.0094. SGS–2012–071

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá tvorbou metodiky návrhu rezonátoru pro bezdrátové nabíjení ve tvaru solenoidu. V úvodu je uveden rozbor parametrů náhradního schématu rezonátoru spolu s možnostmi jejich identifikace. Dále se práce věnuje účinnosti rezonanční vazby a možnostmi její optimalizace. V závěru jsou pak vyvozeny některé poznatky, důležité pro návrh samotný.

Seznam symbolů a zkratek

ω	úhlová rychlost	$[rad s^{-1}]$
f	frekvence	[Hz]
δ	hloubka vniku	[m]
ρ	měrná rezistivita	$[\Omega m]$
μ	permeabilita	$[Hm^{-1}]$
ε	permitivita	$[F m^{-1}]$
С	rychlost světla	$[ms^{-1}]$
k _c	činitel zkrácení	[/]
λ	vlnová délka	[m]
N	počet závitů cívky	[/]
r	poloměr závitu cívky	[m]
r _v	poloměr vodiče	[m]
l	délka cívky	[m]
l_{C}	délka vodiče cívky	[m]
<i>x</i> _{<i>i</i>}	vzdálenost mezi cívkami	[m]
k _l	činitel rozložení pole solenoidu	[/]
k	činitel magnetické indukční vazby	[/]
l_N	délka jednoho závitu cívky	[m]
d	vzdálenost mezi závity	[m]
a	délka hrany obdélníkového vodiče	[m]
R	odpor vodiče	$[\Omega]$
R_i	odpor i-tého závitu cívky	$[\Omega]$
R_C	celkový odpor cívky	$[\Omega]$
R_{ml}	odpor řídící/zátěžné cívky	$[\Omega]$
R_m	reluktance	$\left[H^{-1} ight]$
R _{rad}	vyzařovací odpor	$[\Omega]$
L	indukčnost cívky	[H]
L_i	indukčnost i-tého závitu cívky	[H]
L_C	celková indukčnost cívky	[H]
L_{ml}	indukčnost řídící/zátěžné cívky	[H]
M_{TX}	vzájemná indukčnost řídící cívky a rezonátoru	[H]
M_{RX}	vzájemná indukčnost rezonátoru a zátěžné cívky	[H]
M_{TX-RX}	vzájemná indukčnost rezonátorů	[H]
С	kapacita	[F]

C_{pi}	parazitní mezizávitová kapacita	[F]
C_{pc}	celková parazitní mezizávitová kapacita	[F]
C_T , C_R	externí rezonanční kapacita	[F]
W_{mg}	energie magnetického pole	[J]
Ι	elektrický proud	[A]
Q	činitel jakosti	[/]
$Q_{\scriptscriptstyle TX}$, $Q_{\scriptscriptstyle RX}$	činitel jakosti rezonátoru	[/]
Q_{LRX}	provozní činitel jakosti přijímacího rezonátoru	[/]
Φ	magnetický indukční tok	[<i>Wb</i>]
Ψ	spřažený magnetický indukční tok	[<i>Wb</i>]

Obsah

Anotace	2
Seznam symbolů a zkratek	3
1 Úvod	6
2 Základní rozměry a elektrické parametry	7
2.1 Materiál a rozměry rezonátoru	7
2.2 Elektrické parametry rezonátoru – analytický výpočet	9
2.3 Elektrické parametry rezonátoru – FEM výpočet	10
2.4 Porovnání výsledků z FEM a analytického výpočtu	13
2.5 Materiál a rozměry řídící/zátěžné cívky	14
2.6 Elektrické parametry řídící/zátěžné cívky – analytický výpočet	17
2.7 Elektrické parametry řídící/zátěžné cívky – FEM výpočet	18
2.8 Vazebný činitel jakosti	18
3 Prototyp rezonančního vazebného členu pro bezdrátový přenos energie	19
3.1 Šasi z PVC roury	19
3.2 Opora cívky rezonátoru	20
3.3 Opora řídící/zátěžné cívky	21
3.4 Model rezonančního vazebného členu	22
3.5 Základní měření na prototypu	23
3.5.1 Měřené elektrické parametry	23
3.5.2 Měření účinnosti	24
4 Závěr	26
PŘÍLOHA – A -Vnitřní zapojení anténního tuneru	27
PŘÍLOHA – B	27
5 Seznam obrázků	29
6 Historie revizí	30

1 Úvod

Cílem práce je navrhnout a z hlediska účinnosti přenosu energie optimalizovat rezonátor ve tvaru solenoidu. Tento bude později realizován v podobě prototypu, na kterém bude provedeno množství měření. Aby byl prototyp co možná nejlevnější, je nutné při návrhu počítat s využitím běžně dostupných komponent a materiálů. Návrh se bude řídit poznatky uvedených v [1].

POZN: Odkazy na rovnice převzaté z [1] budou psány tučně.

2 Základní rozměry a elektrické parametry

Pro maximální účinnost rezonátoru je potřeba splnit hned několik podmínek najednou:

- navrhnout řídící/zátěžnou cívku s co nejvyšším Q,
- navrhnout rezonátor s co nejvyšším Q,
- maximalizovat činitel vazby řídící/zátěžné cívky a rezonátoru.

Činitel jakosti je navíc funkce více proměnných a její optimalizace je proto velice pracná a časově náročná. V našem případě je dle zadání většina proměnných zvolenou konstantou a můžeme proto uvažovat závislost pouze na frekvenci. Funkce má tak jen jeden extrém, do kterého bude výhodné umístit pracovní bod (rezonanční frekvenci) rezonátoru. Tato frekvence by měla být co nejnižší s ohledem na možnosti výkonové elektroniky.

Jak plyne z Tab. 2 v [1], extrém funkce činitele jakosti se posouvá směrem k nižším frekvencím společně s rostoucím poloměrem vodiče, poloměrem závitu a počtem závitů.

2.1 Materiál a rozměry rezonátoru

S ohledem na dostupnost, mechanické vlastnosti a cenu bude pro rezonátor použita Cu měkká (R220) trubku [2], o délce 3m. Protože cívku neuvažujeme kvůli možnosti uchycení řídící/zátěžné cívky jako samonosnou, je nutné vyhotovit šasi s co nejlepšími dielektrickými vlastnostmi. K tomuto účelu poslouží HTEM trubky o průměru 300mm s relativně dobrými dielektrickými vlastnostmi [3, 4, 5]. Počet závitů se pak snadno odhadne z upravené rovnice **(3)** uvedené v [1]

$$l_{t} = \frac{2\pi r}{\cos\left(\arctan\left(\frac{d}{2\pi r}\right)\right)} N \quad . \tag{1}$$

Parametr *d* je vzdálenost středů sousedících závitů a nejvíce ovlivňuje parazitní kapacitu rezonátoru, pro kterou jak bylo ukázáno v [1] platí vztah

$$C_{pi} = \frac{3}{2} \frac{\pi \varepsilon_0 l_N}{\ln \frac{d}{r_v}}$$
(2)

Pokud pro již zvolené rozměry vykreslíme graf poměrné mezizávitové kapacity a indukčnosti v závislosti na parametru d, dostaneme výsledky v Obr. 1.



Obr. 1: Závislost poměrné mezi závitové kapacity na d

Je vidět, že oba parametry rychle klesají, přičemž vyšší indukčnost a nižší kapacita znamená lepší činitel jakosti rezonátoru. Optimální rozteč závitů proto bude v místě, kde se nachází největší rozdíl funkcí L=f(d) a C=f(d), na Obr. 1 značeno černou čarou. Do rovnice (1) potom za d dosadíme hodnotu $25e^{-3}$, z čehož vychází počet závitů

$$N = l_t \frac{\cos\left(\arctan\left(\frac{d}{2\pi r}\right)\right)}{2\pi r} = 3 \frac{\cos\left(\arctan\left(\frac{25e^{-3}}{2\pi 160.5e^{-3}}\right)\right)}{2\pi 160.5e^{-3}} = 3.18[/]$$

což je po zaokrouhlení N=3[/] .

Tímto jsme stanovili základní rozměry rezonátoru, z čehož vyjde i jeho vlastní rezonanční frekvence. Vzhledem k potřebám výkonové elektroniky a požadavkům hygienických norem však bude potřeba frekvenci snížit například externím kondenzátorem. Výsledná jakost cívky a tím i účinnost celého systému sice poklesne, ale jak je vidět z Obr. 2, míra změny Q je přijatelná vzhledem k výhodám, které to přinese. Např. v rozmezí $f = (10 \div 32) MHz$ můžeme očekávat pokles činitele jakosti maximálně o 20%.



Obr. 2: Činitel jakosti rezonátoru pro různé frekvence

2.2 Elektrické parametry rezonátoru – analytický výpočet

Parazitní kapacitu určíme z rovnic (9) a (14) známých z [1]

$$C_{pc} = \frac{3}{2} \frac{\pi \varepsilon_0 l_N}{\ln \frac{d}{r_v}} \frac{1}{N-1} = \frac{3}{2} \frac{\pi \varepsilon_0 l_N}{\ln \frac{25 e^{-3}}{3 e^{-3}}} \frac{1}{(3-1)} = 9.2 e^{-12} [F] \text{, pro} \quad l_N = \frac{2 \pi 160.5 e^{-3}}{\cos \left(\arctan \left(\frac{25 e^{-3}}{2 \pi 160.5 e^{-3}} \right) \right)}$$

Také indukčnost byla odvozena v [1] a odpovídá jí vztah (7) a (8)

$$L_C = \mu_0 \frac{N^2 \pi r^2}{k_l l} = 4.3 e^{-6} [H]$$
, pro $k_l = \frac{3.7^2}{3.7 + \frac{1}{1} - 1} = 3.7$ a $k_{SL} = 1 + 0.47 \frac{321 e^{-3}}{56 e^{-3}} = 3.7$.

Činný odpor lze zjistit ze vztahu (6) viz [1]

$$R_{c} = \frac{N \rho l_{c}}{\pi r_{v}} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} = \frac{1.78 e^{-8} 4.81}{\pi 3 e^{-3}} \sqrt{\frac{\mu 24 e^{6}}{1.78 e^{-8}}} = 235 e^{-3} [\Omega] \text{ , pro } f_{r} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{c} C_{pc}}} = 24 e^{6} [Hz]$$

Jako poslední zbývá určit vyzařovací odpor podle rovnice (21) [1]

$$R_{rad} = 320 N^2 \pi^6 \left(\frac{r f}{k_c c}\right)^4 = 75.7 e^{-3} [\Omega] \text{, pro } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$
.

Činitel jakosti odpovídající takovému uspořádání pak vychází dle rov. (19) [1]

$$Q_m = \frac{\omega L_C}{R_{rad} + R_C} = \frac{1.35e^3}{57.2e^{-3} + 325e^{-3}} = 2.14e^3[/]$$

Vypočítaná hodnota je však pouze teoretická, ve skutečnosti zde působí mnoho dalších

vlivů, které není možné zohlednit. Skutečná hodnota pak bude nižší, nicméně k určení tendencí, či maximalizaci Q nám informace takto získaná vyhovuje.

Tab. 1: Shrnutí výsledků – analytický výpočet

	r	$160.5e^{-3}[m]$
Základní rozměry	r _v	$3 e^{-3}[m]$
	d	$25e^{-3}[m]$
	N	3[/]
Elektrické veličiny	R_{C}	$235 e^{-3} [\Omega]$
	R _{rad}	$75.7e^{-3}[\Omega]$
		$4.3e^{-6}[H]$
	C_{pC}	$9.2e^{-12}[F]$
	f _r	$24 e^{6}[Hz]$
	Q	2.14e ³ [/]

2.3 Elektrické parametry rezonátoru – FEM výpočet

Pro výpočet kapacity nejprve sestavíme osově rotačně symetrický konečně prvkový model viz Obr. 3, ve kterém je zatížen jen jeden libovolný sousedící pár závitů a určíme energii pole naakumulovanou ve vzduchovém okolí. Z ní pak lze kapacitu určit přímo z definice

$$W_{el} = \frac{1}{2} C U^2 [J]$$
 . (3)



Model je platný pro statické stavy (elektrostatická analýza), kdy se neuplatňují dielektrické ztráty ani elektrická vodivost žádného z materiálů. Oproti skutečné hodnotě proto získáme hodnotu odlišnou (vyšší). Chyba bude závislá především na vlastnostech okolí a napájecí frekvenci

$$C_{pC} = \frac{2W_{el}}{U^2} \frac{1}{(N-1)} = \frac{1}{2} 1.87 e^{-11} = 9.3 e^{-12} [F]$$
.

Indukčnost se určí z magnetické energie naakumulované ve vodičích a vzduchovém okolí a je dána statickou definicí indukčnosti viz **(18)** z [1]. S výhodou lze využít předchozího modelu Obr. 3, upraveného pro výpočet magnetického pole viz Obr. 4. Můžeme psát



 $L_{C} = \frac{4 W_{mg}}{1^{2}} = 4.6 e^{-6} [H] .$

Obr. 4: Pro výpočet vlastní indukčnosti rezonátoru

Činný odpor lze určit z podobného modelu, jako je vidět v Obr. 4, s tím rozdílem, že se řeší magnetické pole o napájecí frekvenci odpovídající předpokládané rezonanci

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_C C_{pc}}} = 24.3 e^6 [Hz]$$

Drobné odchylky od skutečné frekvence zde nebudou mít velký vliv. Model je vhodný pro ustálené harmonické stavy, kde se uplatňuje elektrická vodivost pro výpočet vířivých proudů. Výpočet proto uvažuje skinefekt i proximity efekt všech vzájemně se ovlivňujících vodičů.

Vypočtená hodnota se bude od skutečné lišit (bude nižší) hlavně tím, že zde není uvažován vliv řídící/zátěžné cívky, jejíž pole v objemu vodiče vytvoří další vířivé proudy. Chyba může být i 50%.

$$\Delta P_J = R I^2 [W] \quad . \tag{4}$$

Z čehož plyne činný odpor cívky

$$R_{C} = \frac{\Delta P_{J}}{\left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^{2}} = \frac{0.440}{1^{2}} = 0.440[\Omega]$$

Výsledek je dále zatížen jistou numerickou chybou způsobenou diskretizací oblasti na konečný počet elementů. Tyto by měly mít velikost alespoň třikrát menší, než je hloubka vniku. Na Obr. 5 je vidět detail rozložení proudové hustoty a sítě modelu. Celý model obsahuje 11.2e⁶ lineárních elementů a ani přesto není síť zcela optimální.



Obr. 5: Problém sítě při vyšších frekvencích (rozložení proudové hustoty)-a) detail povrchu vodičeb) jeden vodič rezonátoru

Činitel jakosti potom vychází

$$Q_m = \frac{\omega L_C}{R_{rad} + R_C} = \frac{703}{75.7 e^{-3} + 440 e^{-3}} = 1.36 e^3 [/]$$

	r	$160.5e^{-3}[m]$
Základní rozměry	r _v	$3 e^{-3}[m]$
	d	$25 e^{-3}[m]$
	N	3[/]
Elektrické veličiny	R_{C}	$440 e^{-3}[\Omega]$
	R _{rad}	$75.7e^{-3}[\Omega]$
	L _C	$4.6e^{-6}[H]$
		$9.3e^{-12}[F]$
	f_r	24.3 $e^{6}[Hz]$
	Q	$1.36e^{3}[/]$

Tab. 2: Shrnutí výsledků – FEM výpočet

2.4 Porovnání výsledků z FEM a analytického výpočtu

Z tabulek Tab. 1 a Tab. 2 jsou patrné jisté rozdíly ve výsledcích obou přístupů k výpočtu elektrických veličin rezonátoru. Obecně lze říci, že přesnější, ale pracnější bude získávat výsledky metodou konečných prvků, která lépe postihne geometrii rezonátoru a chování elektromagnetického pole v jeho okolí při různých frekvencích. Naproti tomu analytická metoda přináší výhodu ve své rychlosti a možnosti řešit velké množství geometrií za sebou bez delší časové prodlevy. Je proto výhodné v první fázi návrhu použít analytické vztahy a ty následně zpřesnit metodou konečných prvků v další fázi optimalizace.

Rozdíl ve výpočtu činného odporu je způsoben již zmíněným jevem blízkosti, který navíc deformuje symetricky vytlačenou proudovou hustotu k povrchu vodiče vlivem skinefektu. Proud proto teče ještě menším průřezem, než jak bylo uvažováno v analytickém vzorci. Dalším rozdílem je fakt, že FEM model je osově rotačně symetrický a délka závitu je proto kratší, než je tomu ve skutečnosti.

Odchylka ve výpočtu indukčnosti je způsobena hlavně předpokládaným tvarem siločár magnetického pole analytickou metodou. Vhodnou volbou činitele k_i v rovnici **(6)** [1] je možné pro určitý tvar rezonátoru odchylku výrazně zmenšit.

Výpočet parazitní kapacity se odchyluje hlavně proto, že se v konečně prvkovém modelu projevuje vliv ostatních závitů, do kterých se elektrostatické pole nedostává. Energie pole je pak menší, než kdybychom výpočet prováděli na koaxiálním uspořádání dvou závitů (uvažuje analytický vztah). Odchylku také způsobuje PVC roura, kterou můžeme pomocí FEM výpočtu uvažovat. Relativně dobrá shoda obou přístupů je zde spíše náhoda, než přesnost analytických vztahů.

Výsledky získané jak FEMM, tak analytickým výpočtem se ke skutečným hodnotám budou jen více, či méně přibližovat a to právě z důvodu výše zmíněných předpokladů geometrického zjednodušení. Přesnější hodnoty bychom získali z komplexního 3D modelu, který přesněji postihne složitý tvar uspořádání řídící cívky a rezonátoru. Takový model by ale byl běžnou výpočetní technikou nespočítatelný (viz Obr. 5).

PARAMETR	FEM	ANALYTICKY	ODCHYLKA
R_{C}	$440e^{-3}[\Omega]$	$235 e^{-3}[\Omega]$	δ=91[%]
R _{rad}	$75.7e^{-3}[\Omega]$	$75.7e^{-3}[\Omega]$	/
L_{C}	$4.6e^{-6}[H]$	$4.3e^{-6}[H]$	$\delta = 7[\%]$
C_{pC}	$9.3e^{-12}[F]$	$9.2e^{-12}[F]$	$\delta = 2[\%]$
f_r	$24.3e^{6}[Hz]$	$24 e^{6} [Hz]$	$\delta = 2[\%]$
Q	$1.36e^{3}[/]$	$2.14e^{3}[/]$	$\delta = -57[\%]$

Tab. 3: Porovnání FEM a analytických vztahů

V Tab. 3 jsou přehledně znázorněny odchylky FEM výpočtu vzhledem k analytickému výpočtu. Je vidět, že opomenutím kontrolního výpočtu (zpřesněním) metodou konečných prvků bychom do návrhu zavedli velkou chybu.

2.5 Materiál a rozměry řídící/zátěžné cívky

Pro činitel jakosti platí stejné vztahy jako tomu bylo u rezonátoru s tím rozdílem, že se nebude uvažovat vyzařovací odpor, můžeme potom napsat

$$Q_{ml} = \frac{\omega L_{ml}}{R_{ml}} [/] \quad .$$
(5)

Pro snazší impedanční přizpůsobení provedeme řídící cívku jako diskovou s počtem závitů

N=3 a mezizávitovou vzdáleností $10e^{-3}[m]$. Převod mezi touto a rezonátorem pak bude k=1. Cívku umístíme v polovině délky rezonátoru (ve smyslu kapitoly 3.2.1 [1]). Průřez vodiče $(S_v=10e^{-6}[m^2])$ byl zvolen na základě nabídky běžně dostupných

standardizovaných drátů. Z toho vychází poloměr vodiče $r_{vl} = \sqrt{\frac{10e^{-6}}{\pi}} = 1.8e^{-3}[m]$. Vzhledem k rozměrům nosné PVC roury bude největší poloměr závitu řídící/zátěžné cívky

 $r_l = 150 e^{-3} - 1.8e^{-3} = 148.2e^{-3}[m]$. Před samotným výpočtem elektrických parametrů cívky musíme nejprve upřesnit základní geometrické rozměry. Materiál a průřez vodiče byl zvolen, vhodný poloměr vnějšího závitu nikoliv.

Tento bude ovlivňovat vzájemnou kapacitu cívky a rezonátoru, která je v případě plánovaných frekvencích nežádoucí. Situaci je možné vyřešit zmenšením poloměru, čímž vzroste vzdálenost mezi vodiči a zároveň poklesne kapacita. Na druhou stranu se ale zhorší činitel indukční vazby obou cívek

$$k = \frac{M_{TX}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M_{RX}}{\sqrt{L_3 L_4}} \quad .$$
 (6)

Pro jeho výpočet chybí určit jen vzájemnou indukčnost cívky L₁-L₂ a L₃-L₄ (budou stejné) na Obr. 13 v [1] a vlastní indukčnost řídící/zátěžné cívky. V tomto konkrétním případě není vhodné pro vzájemnou indukčnost použít vztahu **(33)** z [1], protože dobře vyhovuje cívkám s počtem závitů N>10. Aplikujeme proto rovnici **(32)** z odstavce 3.2 v [1] viz Obr. 6. Navíc, protože není dobře možné započítat proud v rezonátoru (reakce na budící pole), který bude vzájemnou indukčnost ovlivňovat, omezíme se pouze na výpočet "stejnosměrné" vzájemné indukčnosti pro kterou platí



Obr. 6: Pro výpočet vzájemné a vlastní indukčnosti

Pro vlastní indukčnost využijeme definice $L_c = \frac{2W_{mg}}{I^2}$ - uvažujeme stejnosměrné napájení. Dosazením do rov. (6) pak získáme velikost činitele vazby pro danou pozici (poloměr) cívky. Zopakujeme-li postup pro různé poloměry, dostaneme závislost $k = f(r_{ml})$, kterou dále využijeme při optimalizaci činitele vazby a vzájemné kapacity (Obr. 8).

Vzájemná kapacita je podle Obr. 7b sério-paralelním spojením dílčích kapacit mezi jednotlivými závity rezonátoru a samotné řídící cívky. Pro jednoduchost stačí brát v úvahu pouze jeden závit (Obr. 7b) a to proto, že konkrétní hodnota kapacity nás nezajímá. Podstatné jsou tendence, které takto snadno zjistíme. Celková kapacita se pak určí jako



Obr. 7: Vzájemná kapacita cívek-

a) zjednodušený model

b) komplexní model

Tab. 4. Vysicaky pro razne poloniery naici/zalezne civky (vnejší zal	ταυ. 4. νγδιεύκγ μιο τύζπε μοιοι	111ELY TIUICI/ZALEZITE CIVKY (VITEJSI 2	<i>αν</i> ιι
--	----------------------------------	---	--------------

$r_{ml}[m]$	0.145	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10
$L_{ml}[\mu H]$	4.9	4.7	4.24	3.78	3.34	2.9
$M_{12}[\mu H]$	3	2.68	2.16	1.73	1.37	1.08
k[/]	0.63	0.58	0.49	0.41	0.35	0.3

Na Obr. 8 je vynesena závislost poměrného činitele magnetické vazby a vzájemné kapacity (podle Obr. 7) na poloměru řídící/zátěžné cívky. Hodnoty jsou vždy vztaženy k

nejvyšší hodnotě. Tabelárně jsou pak vypsány v Tab. 4. Jak je vidět, činitel vazby klesá téměř lineárně, zatímco vzájemná kapacita se v bodě $r_{ml}=0.14[m]$ téměř ustaluje. V tomto případě budeme předpokládat, že právě zde se z hlediska maximalizace vazby a minimalizace vzájemné kapacity cívky a rezonátoru nachází optimální poloměr vnějšího závitu řídící/zátěžné cívky.



Obr. 8: Pro optimalizaci poloměru řídící/zátěžné cívky

2.6 Elektrické parametry řídící/zátěžné cívky – analytický výpočet

V zásadě je možné použít podobných vztahů jako v odstavci 2.2. Pro činný odpor opět

platí známé $R_{ml} = \frac{\rho l_N}{\pi r_v} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}$. Cívka samotná má tvar degenerované části Archimédovy spirály a není proto snadné pohodlně určit její délku. Omezíme se proto na zjednodušený výpočet pomocí středního poloměru cívky

$$R_{ml} = \frac{\rho l_C}{\pi r_v} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} = \frac{1.78 e^{-8} 2.45}{\pi 1.8 e^{-3}} \sqrt{\frac{\mu 23 e^6}{1.78 e^{-8}}} = 318 e^{-3} [\Omega] .$$

Pro indukčnost cívky tohoto uspořádání neexistuje dostatečně přesná aproximace a nebude zde proto počítána, stejně tak jako parazitní kapacita, které je v tomto přiblížení nedůležitá.

2.7 Elektrické parametry řídící/zátěžné cívky – FEM výpočet

Způsob výpočtu je analogický postupu uvedeném v odstavci 2.3. Využít můžeme upraveného modelu z Obr. 6.

Činný odpor je

$$R_{ml} = \frac{\Delta P_J}{\left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{0.0625}{1^2} = 327 \, e^{-3} [\Omega]$$

Vypočtená hodnota se bude od skutečné lišit (bude nižší) hlavně tím, že zde není uvažován vliv rezonátoru, jehož pole v objemu vodiče vytvoří další vířivé proudy. Chyba může být i 50%.

Indukčnost vychází

$$L_{c} = \frac{4W_{mg}}{1^{2}} = 4.7e^{-6}[H] \text{ , což dává činitel jakosti } Q_{ml} = \frac{\omega L_{ml}}{R_{ml}} = \frac{720}{327e^{-3}} = 2.2e^{3}[/] \text{ .}$$

Základní	r	$125 e^{-3}[m]$		
rozměry	r _v	$1.8e^{-3}[m]$		
		FEM	ANALYTICKY	ODCHYLKA
Elektrické veličiny	R_{ml}	$327 e^{-3}[\Omega]$	$318e^{-3}[\Omega]$	δ=3[%]
	L_{ml}	$4.7e^{-6}[H]$	/	/
	Q	2.2e ³ [/]	/	/

Tab. 5: Porovnání FEM a analytických vztahů

2.8 Vazebný činitel jakosti

Vazebným činitelem jakosti kQ rozumíme souborného činitele jakosti spojení řídící/zátěžné cívky a rezonátoru, pro kterého můžeme psát

$$kQ = k_{12}\sqrt{Q_{LI}Q_{L2}} = k_{34}\sqrt{Q_{L3}Q_{L4}} = \frac{M_{TX}\sqrt{Q_{LI}Q_{L2}}}{\sqrt{L_1L_2}} = \frac{M_{RX}\sqrt{Q_{L3}Q_{L4}}}{\sqrt{L_3L_4}} \quad .$$
(8)

Dosazením do rovnice (8) z Tab. 3 a Tab. 4 a odstavce 2.7 přímo zjistíme teoretickou hodnotu vazebného činitele jakosti. A protože jsme vzájemnou indukčnost určili pouze na základě výpočtu metodou konečných prvků, nebudeme již dosazovat výsledky získané analyticky

$$kQ = \frac{M_{TX}\sqrt{Q_{L1}Q_{L2}}}{\sqrt{L_1L_2}} = \frac{M_{RX}\sqrt{Q_{L3}Q_{L4}}}{\sqrt{L_3L_4}} = \frac{1.32e^{-6}\sqrt{2.2e^31.36e^3}}{\sqrt{4.7e^{-6}4.6e^{-6}}} = 997[/]$$

3 Prototyp rezonančního vazebného členu pro bezdrátový přenos energie

První prototyp rezonančního vazebného členu byl vyhotoven ve dvou exemplářích (vysílací a přijímací část) podle návrhu dle kapitoly 2. Prototyp se skládá z následujících součástí.

SOUČÁST	POČET KUSŮ
Šasi z HTEM trubky	2
Opora rezonátoru	8
Opora řídící/zátěžné cívky	4
Cu trubka (rezonátor)	2
Cu drát (řídící/zátěžná cívka)	2
Plastové šrouby a matky M6x40 mm	16
Kondenzátor 100B – 82 pF	2

Tab. 6: Kusovník pro výrobu prototypu

3.1 Šasi z PVC roury



Obr. 9: Náčrtek šasi z PVC roury



Obr. 10: Skutečný tvar šasi z HTEM roury

3.2 Opora cívky rezonátoru

Konstrukční prvek je vyroben ze silonové tyče o průměru 30 mm.



Obr. 11: Náčrtek opory cívky rezonátoru



Obr. 12: Skutečný tvar opory cívky rezonátoru

3.3 Opora řídící/zátěžné cívky

Konstrukční prvek je vyroben z elektroizolačního materiálu na bázi tvrzené textilní tkaniny často označovaného jako texgumoid.



Obr. 13: Náčrtek opory řídící/zátěžné cívky



Obr. 14: Skutečný tvar opory řídící/zátěžné cívky

3.4 Model rezonančního vazebného členu

Pro názornost byl vytvořen 3D model rezonančního vazebného členu pomocí CAD SW SOLIDWORKS.



Obr. 15: vazebný člen – pohledy a)



Obr. 16: vazebný člen – pohledy b)

3.5 Základní měření na prototypu

Pro ověření funkčnosti rezonátoru bylo provedeno základní měření účinnosti při různých vzdálenostech přijímacího a vysílacího modulu. Dále byly proměřeny elektrické parametry prototypu pro ověření metodiky výpočtů uvedené v kap. 2.

3.5.1 Měřené elektrické parametry

Jako kontrolní (měřené) veličiny byly zvoleny indukčnost řídící/zátěžné cívky, indukčnost rezonátoru a rezonanční frekvence vazebného prvku. Měření bylo provedeno na RLC měřiči HM 8118 [6].

$$L_{rezonátor} = 5.7 e^{-6} [H]$$

$$L_{\check{r}idici} = 5.41 e^{-6} [H]$$

Rezonanční frekvence bez připojeného externího kondenzátoru je $f_r=29.5e^6[Hz]$. Připojením kondenzátoru, dojde ke snížení této frekvence na hodnotu $f_r=9e^6[Hz]$ (měřeno vektorovým analyzátorem R&S ZVB8[7]). Skutečná jeho velikost je $C_{ext}=85e-12[F]$. Z uvedeného přímo plyne velikost parazitní mezizávitové kapacity rezonátoru

$$Cp_{rezonátor} = \frac{1}{\omega^2 L_{rezonátoru}} = 5.1 e^{-12} [F]$$

V Tab. 7 jsou vyčíslené odchylky výpočtu metodou konečných prvků od měření (vztaženo k FEM). Rozdíly jsou vzhledem ke zjednodušením (modelovaný tvar cívky), které byly v úvodu přijaty relativně malé. Velký vliv má také kvalita provedení navrženého rezonátoru, hlavně ekvidistantní rozmístění závitů a jejich rovnoběžnost. Preciznější provedení by se výpočtu přiblížilo více.

PARAMETR	FEM	MEŘENÍ	ODCHYLKA
L _{rez}	$4.6e^{-6}[H]$	$5.7e^{-6}[H]$	$\delta = -20[\%]$
$L_{\check{r}id}$	$4.7e^{-6}[H]$	$5.41e^{-6}[H]$	$\delta = -13[\%]$
Cp _{rez}	$9.3e^{-12}[F]$	$5.1e^{-6}[H]$	δ=82[%]
f _r	$24.3e^{6}[Hz]$	29.5e ⁶ [<i>Hz</i>]	$\delta = -18[\%]$

Tab. 7: Porovnání FEM výsledků s měřením

3.5.2 Měření účinnosti

Úloha byla zapojena podle Obr. 17, kde jako zdroj energie slouží radiostanice FT-857D s maximálním výkonem 100 W při frekvenci 30 MHz a výstupní impedanci 50 Ω [8]. Výkon byl měřen pomocí wattmetru CN-801 typu H s rozsahem 200 MHz a rozsahy měřeného výkonu 20/200/2000 W [9]. Dále byl použit anténní tuner s rozsahem 1.8 - 30 MHz a maximálním přenášeným výkonem až 500 W [10] pro impedanční přizpůsobení rezonátoru.



Obr. 17: Schéma zapojení při měření účinnosti vazby

Měření probíhalo v krocích pro různé vzdálenosti vysílacího a přijímacího modulu. Vzdálenost byla měřena vždy od posledního závitu vysílací cívky k prvnímu závitu přijímací cívky. Výsledná účinnost uvedená v Tab. 8 je prakticky stejná i v případě přenášeného výkonu 20 W.

Vzdálenost [cm]	zdálenost [cm] P ₁ [W] P ₂ [W]		Účinnost [%]	
10	4.05	3.9	96	
15	4.1	3.85	94	
20	4.1	3.55	87	
25	4	2.9	73	

Tab. 8: Výsledná účinnost vazby při f=9 MHz

Výsledky měření, zvláště pro větší vzdálenosti, jsou zatížené jistou chybou, která je způsobena ztrátami v tuneru (viz pozn.). Tyto vzhledem k impedanci rezonátoru nemůžeme přesně měřit a proto výsledná účinnost bude ve skutečnosti o něco vyšší.

Pozn.: Čím větší je rozdíl přizpůsobovaných impedancí, tím vyšší jsou ztráty v tuneru viz PŘÍLOHA – A.



Obr. 19: Výsledná účinnost rezonanční vazby

4 Závěr

Z výsledků měření vyplývá relativně dobrá shoda navrženého vazebného členu s realizovaným. Tímto je ověřena metodika návrhu rezonátoru z [1]. Účinnost přenosu energie dosahuje velikosti 97 % při vzdálenosti cívek 10 cm a 73 % při 25 cm. Parametry rezonančního vazebného členu by šly dále vylepšit např. spirálovým tvarem rezonátoru a lepším přizpůsobením vůči zdroji vysílané energie. Vzhledem k hygienickým normám a potřebám výkonové elektroniky bude dále potřeba snížit rezonanční frekvenci, toho se dá dosáhnout rozměrovou optimalizací a připojením externího kondenzátoru s vyšší kapacitou.

Nutno zmínit, že provedený návrh využíval běžně dostupných materiálů a komponent (PVC roura, Cu trubka), což výrazně omezilo možnosti optimalizace. Parametry dále zhoršuje jen "amatérské" provedení prototypu.

Z tohoto se dá usuzovat, že by v případě optimalizované geometrie bylo možné dosáhnout ještě lepších výsledků.

PŘÍLOHA – A -Vnitřní zapojení anténního tuneru

Anténní tuner vyrobil Ing. Tomáš Kavalír pro potřeby radioklubu OK1OUE [7].



PřílohaA 1: Vnitřní zapojení anténního tuneru

PŘÍLOHA – B



PřílohaB 1: Ukázka přenosu výkonu 20 W

Seznam použité literatury

[1] Kindl, V., spol.; "Metodika návrhu rezonátoru ve tvaru solenoidu pro bezdrátové nabíjení", výzkumná zpráva, RICE, č.z. 22190-012-2013

[2] ČSN EN 1057+A1, Měď a slitiny mědi - Trubky bezešvé kruhové z mědi pro vodu a plyn pro sanitární instalace a vytápěcí zařízení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[3] Ghodgaonkar, D.K.; Varadan, V.V.; Varadan, Vijay K., "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol.38, no.3, pp.789,793, Jun 1989

[4] Quennehen, P.; Seytre, G.; Royaud, I.; Gain, O.; Rain, P.; Espilit, T., "Dielectric and physicochemical behavior of aged PVC insulated cables," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on*, vol., no., pp.855,858, 14-17 Oct. 2012

[5] Friedsam, G.L.; Biebl, E.M., "Precision free-space measurements of complex permittivity of polymers in the W-band," *Microwave Symposium Digest, 1997., IEEE MTT-S International*, vol.3, no., pp.1351,1354 vol.3, 8-13 June 1997

[6] Data sheet HM 8118. HAMEG [online]. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://www.hameg.com/

[7] Data sheet R&S ZVB8. http://www.rohde-schwarz.com/en/home_48230.html [online]. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z:

http://www.testunlimited.com/pdf/RohdeSchwarz_ZVB.pdf

[8] Data sheet Yaesu FT-857D. YAESU [online]. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://www.yaesu.com/

[9] Data sheet CN-801D. DAIWA [online]. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://www.daiwa-industry.co.jp/english/

[10] Popis tuneru ok1gth.ok1gth [online]. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://ok1gth.nagano.cz/tuner.htm

5 Seznam obrázků

Obr. 1: Závislost poměrné mezi závitové kapacity na d	8
Obr. 2: Činitel jakosti rezonátoru pro různé frekvence	9
Obr. 3: Pro výpočet parazitní kapacity	10
Obr. 4: Pro výpočet vlastní indukčnosti rezonátoru	11
Obr. 5: Problém sítě při vyšších frekvencích (rozložení proudové hustoty)	12
Obr. 6: Pro výpočet vzájemné a vlastní indukčnosti	15
Obr. 7: Vzájemná kapacita cívek	16
Obr. 8: Pro optimalizaci poloměru řídící/zátěžné cívky	17
Obr. 9: Náčrtek šasi z PVC roury	19
Obr. 10: Skutečný tvar šasi z PVC roury	20
Obr. 11: Náčrtek opory cívky rezonátoru	20
Obr. 12: Skutečný tvar opory cívky rezonátoru	21
Obr. 13: Náčrtek opory řídící/zátěžné cívky	21
Obr. 14: Skutečný tvar opory řídící/zátěžné cívky	21
Obr. 15: vazebný člen – pohledy a)	22
Obr. 16: vazebný člen – pohledy b)	22
Obr. 17: Schéma zapojení při měření účinnosti vazby	24
Obr. 18: Naměřené výkony	25
Obr. 19: Výsledná účinnost rezonanční vazby	25

6 Historie revizí

Dov	Kanitola	nitola Ponis změny	Datum
		Jméno / Kat.	
1.0	Včo	Drupí vorzo dokumontu	25. 6. 2013
1.0 Vse		Kindl / KEV	
1 1			26. 6. 2013
1.1	Drobne upravy (preklepy, nevnodne slovní spojení)		Kavalír / KAE